

АСПЕКТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКЕ В ЭЛЕКТРОСЕТЯХ



ОРЛОВ Павел Сергеевич, Ярославская государственная сельскохозяйственная академия

ШКРАБАК Владимир Степанович, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

ГОЛДОБИНА Любовь Александровна, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»

ШКРАБАК Роман Владимирович, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

КОЧКИН Сергей Петрович, Ярославская государственная сельскохозяйственная академия

ХУДЯЕВ Олег Владимирович, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет

Приведены результаты исследований по влиянию несимметричной нагрузки на эффективность и безопасность использования электрической энергии в агропромышленном комплексе страны и электрифицированных объектах других видов экономической деятельности. Отмечается, что симметричная нагрузка по фазам приводит к резкому сокращению электрических потерь в сетях. Так принималось во внимание, что равномерное распределение нагрузки по фазам снижает потери в сети в 6 раз по сравнению с однофазной нагрузкой, и в 2,25 раза по сравнению с двухфазной. Неравномерность нагрузки отрицательно сказывается на работе трансформаторов, перегреве электродвигателей, снижении срока службы ламп накаливания, изоляции электрооборудования. Предложенное авторами решение – устройство для симметричного распределения нагрузки по фазам трехфазной сети – позволяет решить отдельные аспекты обсуждаемой проблемы.

Эффективность и безопасность электроснабжения сельскохозяйственного производства зависит от конструктивных, эксплуатационных и трудовых факторов, существенным образом влияющих на результат. Определяющими требованиями к конструктивным факторам являются стабильное обеспечение потребителей сельского хозяйства (производство, хранение, переработка, быт, системы жизнеобеспечения и функционирования и др.) и его агропромышленного комплекса (АПК) в целом (комбикормовые заводы, элеваторы, мукомольные предприятия, мясомолочная, хлебопекарная, кондитерская и другие виды деятельности) постоянным, качественным и своевременным энергопитанием. Определяющими требованиями к эксплуатации систем электрообеспечения является поддержание их в работоспособном состоянии с обеспечением высококвалифицированным профессионалом и требуемой для этого материально-технической базой для профилактики и своевременного устранения неполадок и аварийных ситуаций (транспорт, оперативная связь, средства индивидуальной защиты и др.).

В решении поставленных задач важны базовые мероприятия, исключаящие ситуации, ве-

дущие к негативным последствиям при использовании электроэнергии для различных целей жизнедеятельности. Специалисты обоснованно утверждают о целесообразности создания ситуаций с равномерным распределением нагрузок по фазам электросети. Однако специфика сельскохозяйственного производства, быта населения и его жизнедеятельности на практике такова, что невозможно абсолютно равномерно распределить однофазные (и неполнофазные) электроприемники по трем фазам четырех- и пятипроводной систем и обеспечить равномерность графика потребления нагрузки по фазам. Поэтому всегда наблюдается неравномерная загрузка сети по фазам, приводящая к искажению фазных и линейных напряжений у потребителя с нарушением симметрии токов в фазных проводах, а в нулевом проводе (в нейтрали) появляется ток $I_N = \sum I_{\Phi}$, равный геометрической (векторной) сумме фазных токов. Ток в нулевом проводе вызывает падение напряжения ΔU_N и смещение нейтрали, приводящее при несимметричной нагрузке к потерям фазного напряжения на участках сети:

$$\Delta U_{\Phi} = I_{\Phi}(R_{\Phi} \cos \varphi + X_{\Phi} \sin \varphi),$$

где R_{Φ} и X_{Φ} – активное и индуктивное сопротив-



ление участка (фазы или трансформатора), по которому течет ток нагрузки.

Суммируя падения напряжений на участках, находят падение фазного напряжения от источника $U_{\text{ФИСТ}}$ до потребителя $\Delta U_{\text{Ф}\Sigma}$:

$$\Delta U_{\text{Ф}\Sigma} = \sum_{i=1}^n \Delta U_{\text{Ф}i} = \sum_{i=1}^n \Delta U_{\text{ФЛЭП}i} + \sum_{i=1}^n \Delta U_{\text{ФТР}i}$$

Тогда фазное напряжение у потребителя (электроприемника $U_{\text{ФЭПР}}$):

$$U_{\text{ФЭПР}} = U_{\text{ФИСТ}} - \Delta U_{\text{Ф}\Sigma} - \Delta U_N.$$

В большинстве случаев несимметричная нагрузка на присоединении приводит к искажению симметрии напряжений у всех потребителей этого присоединения. По мере приближения от потребителя с несимметричной нагрузкой к источнику неограниченной мощности искажения напряжения уменьшаются. Несимметричная нагрузка ведет к тому, что в фазных проводах текут разные токи; появляется ток и в нулевом проводе, что влияет на потерю мощности и энергии в линии, которые в 2 и более раз превышают потери электрической энергии по сравнению с сетями, работающими в симметричных режимах [9, 10].

Рассмотрим одинаковую несимметричную нагрузку по фазам: фаза А нагружена тремя параллельно включенными активными сопротивлениями $3R$. Остальные фазы не нагружены. Принимаем (для упрощения расчетов): сопротивление фазной линии $R_{\text{Ф}}$, равное сопротивлению нулевого R_N провода: $R_{\text{Ф}} = R_N$; не учитываем потерю напряжения в питающих проводах. Тогда через каждое сопротивление нагрузки R будет протекать ток I , ток по фазе А и по нулевому проводу равны $3I$. Потери мощности в линии:

$$\Delta P_{\Sigma}^A = \Delta P_{\text{Ф}}^A + \Delta P_N^A = (3I)^2 R_{\text{Ф}} + (3I)^2 R_{\text{Ф}} = 18I^2 R_{\text{Ф}}.$$

Ту же нагрузку распределим равномерно по двум фазам, нагрузка каждой из которых состоит из параллельно включенных сопротивлений R и $2R$; по каждой из фаз и по нулевому проводу в соответствии с векторной диаграммой (геометрическая сумма двух одинаковых по модулю векторов равна по модулю каждого из слагаемых), протекает ток $1,5I$. Потери мощности в линии (в фазах А и В и в нулевом проводе) составят:

$$\Delta P_{\Sigma}^{AB} = \Delta P_{\text{Ф}}^A + \Delta P_{\text{Ф}}^B + \Delta P_N^{AB} = 3(1,5I)^2 R_{\text{Ф}} = 6,75 I^2 R_{\text{Ф}}.$$

По сравнению с однофазной нагрузкой потери в линии сократятся в 2,66 раза.

Равномерное распределение нагрузки по фазам обеспечивает равные фазные сопротивления R и токи I ; геометрическая сумма трех равных по модулю токов равна нулю и ток в нулевом проводе также равен нулю. Потери мощности в линии (в фазах А, В и С) составят:

$$\Delta P_{\Sigma}^{ABC} = \Delta P_{\text{Ф}}^A + \Delta P_{\text{Ф}}^B + \Delta P_{\text{Ф}}^C = 3I^2 R_{\text{Ф}} = 3I^2 \rho L / F.$$

Электрические потери пропорциональны активному сопротивлению проводов ρ и длине ли-

нии L . Увеличение сечения проводов F снижает потери мощности, а симметрирование нагрузки приводит к резкому сокращению электрических потерь в сетях: равномерное распределение нагрузки по фазам снижает потери в сети в 6 раз по сравнению с однофазной нагрузкой и в 2,25 раза по сравнению с двухфазной [5]. Неравномерная нагрузка отрицательно сказывается не только на работе линии, но и на работе трансформаторов. Отсутствие симметрии вторичных напряжений трансформаторов неблагоприятно отражается на потребителях: у асинхронных электродвигателей при питании их несимметричными напряжениями появляются симметричные составляющие токов обратной последовательности, магнитный поток становится эллипсным и электрическая машина генерирует обратный вращающийся момент, снижающий крутящий момент на валу машины, вызывающий повышенный ток и перегрев электродвигателя; у ламп накаливания при питании повышенным напряжением резко снижается срок службы, питание ламп накаливания пониженным напряжением существенно снижает световой поток.

У трансформаторов несимметричная нагрузка вызывает перегрузку отдельных его обмоток, повышение фазных напряжений и насыщение магнитопровода. Работу трансформаторов в несимметричных режимах объясняют с помощью симметричных составляющих, в которых векторы токов прямой последовательности достигают максимумов последовательно в фазах А, В и С одинаковых по модулю. Векторы токов обратной последовательности также равны по модулю и достигают максимумов последовательно в фазах А, С и В. Система токов нулевой последовательности во всех трех фазах имеет одно направление (нулевой сдвиг по фазе) и равенство по модулю. Появление токов и магнитных потоков нулевой последовательности аналогично появлению токов и магнитных потоков третьей гармоники, но они имеют разную природу возникновения. Токи и магнитные потоки нулевой последовательности появляются вследствие несимметрии нагрузки, а потоки и токи третьей гармоники возникают из-за несимметрии магнитной системы и нелинейности магнитной характеристики стали магнитопровода. Кроме того, токи и магнитные потоки нулевой последовательности изменяются с частотой сети, а токи (и магнитные потоки) третьей гармоники – с утроенной частотой. Большая часть магнитных потоков нулевой последовательности охватывает первичную и вторичную обмотки, они являются потоками взаимной индукции, индуцирующими в обмотках ЭДС нулевой последовательности, но в случае отсутствия нулевого провода в трех-



стержневом трансформаторе токи нулевой последовательности в обмотках отсутствуют, так как в этом случае обмотки трансформатора для них разомкнуты [4, 13].

В отличие от вращающихся роторов электрических двигателей в трансформаторах, сопротивления прямой последовательности равны сопротивлениям обратной последовательности: если у трансформатора, работающего с симметричной нагрузкой, изменить порядок чередования фаз (поменять местами два провода из трех, которые подводят к первичной обмотке напряжение сети), то чередование токов фаз трансформатора изменится на обратное, но внутреннее сопротивление трансформатора не изменится. Следовательно, токи обратной последовательности трансформируются из вторичной обмотки в первичную, как и токи прямой последовательности и имеют одни и те же схемы замещения [5].

Сопротивление нулевой последовательности отличается от сопротивлений прямой и обратной последовательностей по значению и характеру, поскольку токи нулевой последовательности во всех трех фазах равны по модулю, не имеют сдвига по фазе и сумма их не равна нулю. Сопротивление нулевой последовательности и схема замещения для токов нулевой последовательности зависит как от схемы соединения обмоток, так и от конструкции магнитной системы трансформатора. При разложении несимметричной системы линейных токов вторичной обмотки трансформатора на симметричные составляющие нулевая последовательность может отсутствовать: токи нулевой последовательности могут существовать только в том случае, когда для них имеется контур, по которому они могут замкнуться, который существует только тогда, когда обмотка соединена по схеме звезда с нулевым проводом. В этом случае токи нулевой последовательности фаз замыкаются через нулевой провод, а ток в нулевом проводе равен утроенному значению тока нулевой последовательности. Токи нулевой последовательности вторичной обмотки трансформатора не уравновешены соответствующими токами первичной обмотки и не трансформируются в первичную обмотку трансформатора Y/Y_N (для них цепь первичной обмотки разомкнута – для токов нулевой последовательности все фазы первичной обмотки параллельны). Поэтому токи нулевой последовательности, протекая только по вторичным обмоткам, являются намагничивающими и создают в стержнях магнитопровода магнитные потоки нулевой последовательности, равные по модулю и параллельно направленные (в одну сторону). Поэтому магнитные потоки нулевой последовательности, возникшие в

каждом из стержней магнитопровода трансформатора, не могут замкнуться через своих соседей, так как эти магнитные потоки имеют одинаковое направление в каждом из стержней. В результате магнитный поток нулевой последовательности замкнется от ярма к ярму через окружающее обмотки пространство. В трехстержневых трансформаторах потоки нулевой последовательности относительно малы, так как замыкаются от ярма к ярму через среду с огромным магнитным сопротивлением – воздух и трансформаторное масло, металлический крепеж и стенки кожуха или бака трансформатора. Замыкание магнитных потоков через металлические детали приводит к появлению вихревых токов, разогревающих масло, обмотки и бак трансформатора. Перегрев сокращает срок службы изоляции. Растет температура масла, не позволяя нагрузить трансформатор даже номинальной нагрузкой, падает КПД трансформатора. Магнитные потоки нулевой последовательности индуцируют в обмотках ЭДС смещающие нейтраль фазных напряжений и увеличивая несимметрию нагрузки [4, 8].

Трехфазные асинхронные машины проектируют для работы с коэффициентом обратной последовательности $K_{2U} \leq 2\%$. В сельскохозяйственных и в промышленных сетях с двухфазной нагрузкой этот норматив часто нарушается. При работе электродвигателя на номинальном вращающем моменте и $K_{2U} = 4\%$ срок службы изоляции снижается в 2 раза. При несимметрии напряжений одно- или двухфазные напряжения могут превышать номинальное значение, сокращая срок службы изоляции электрооборудования еще больше. Поскольку нулевая точка электродвигателя не соединяется с нулевой точкой источника, токи нулевой последовательности не протекают через статорные обмотки, поэтому система токов, протекающих в статорных обмотках при несимметрии питающих напряжений, может быть разложена только на токи прямой и обратной последовательности. Скольжение для тока прямой последовательности:

$$s_1 = s_{\text{НОМ}} = (n_1 - n_2)/n_1.$$

Скольжение для тока обратной последовательности:

$$s_2 = [n_1 - (-n_2)]/n_1 = (n_1 + n_2)/n_1.$$

Подставим в формулу значение n_2 :

$$s_2 = [n_1 - (-n_2)]/n_1 = (n_1 + n_2)/n_1 = [n_1 + n_1(1 - s_{\text{НОМ}})]/n_1 = 2 - s_{\text{НОМ}}$$

Частота тока обратной последовательности в роторе почти в 2 раза выше, чем для

симметричных составляющих прямой последовательности. Это приводит к перегреву ротора, температура которого на 35...40 °С выше температуры статора. Тепловое расширение стержней ротора приводит к повреждению роторной обмотки машины, снижая мощность электродвигателя и вызывая периодические колебания потребляемых токов (в асинхронных машинах снижение вращающего момента незначительно только до $K_{2U} \leq 4\%$). Значительная несимметрия (более 5 %) приводит к вибрации электродвигателя в результате появления знакопеременных вращающих моментов и сил, пульсирующих с двойной частотой. Электродвигатель, работающий под нагрузкой или вхолостую, уменьшает несимметрию питающей сети, так как становится источником ЭДС в фазе с наименьшим напряжением. Такой уравнивающий эффект растет с уменьшением сопротивления обмотки [3] и возрастет с ростом мощности машины.

В сетях ЕЭС РФ количество современных компенсирующих устройств исчисляется единицами, а фильтрокомпенсирующие, фильтросимметрирующие, фазосдвигающие устройства практически отсутствуют. Не существует программы их разработки и внедрения в электрических сетях, поэтому невозможно существенное повышение энергетической эффективности российской электроэнергетики. Вместе с тем, существует указ Президента РФ № 889 «О снижении потерь электроэнергии к 2020 г. на 40 % по сравнению с 2007 г.».

Тем не менее, и в СССР, и в современной России постоянно велись и ведутся теоретические исследования по созданию симметрирующих устройств, что позволит рассчитать параметры и создать реактивные симметрирующие устройства, для чего необходима информация о динамике изменения параметров нагрузки.

Существует органический неустранимый недостаток подобных симметрирующих устройств – невозможность плавной компенсации токов обратной и нулевой последовательностей из-за ступенчатого изменения емкостей конденсаторных батарей и индуктивностей, что позволяет только уменьшить, но не устранить полностью несимметрию нагрузки.

Для снижения потерь и повышения качества электроэнергии в сетях 0,38 кВ разработано фильтросимметрирующее устройство (ФСУ) для трехфазной четырехпроводной сети, содержащее три конденсаторные батареи (КБ) со ступенчатым регулированием емкости, соединенные по схеме «звезда» (рис. 1). Между нулевой точкой и нейтралью ФСУ включена рабочая обмотка I магнитного усилителя (МУ), обмотка управления II которого запитана от выпрямителя через регулировочные резисторы R_1 и R_2 . Кон-

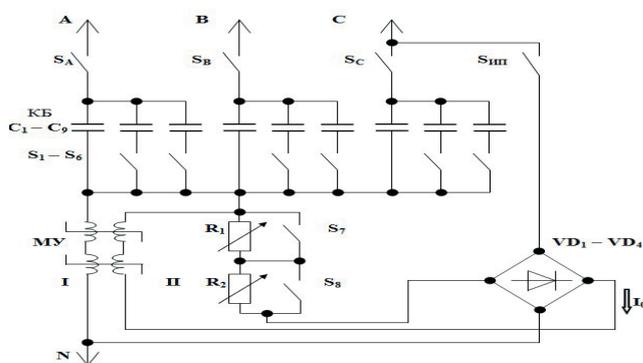


Рис. 1. Фильтросимметрирующее устройство

денсаторные батареи и рабочая обмотка I МУ, включенные последовательно, работают в режиме резонанса напряжения.

ФСУ, включенное в трехфазную четырехпроводную сеть напряжением 0,4 кВ с несимметричной нагрузкой, обладая малым сопротивлением нулевой последовательности (активным сопротивлением R_{L1} рабочей обмотки I МУ) шунтирует токи нулевой последовательности сети, снижая потери в линии и в трансформаторе и повышая качество электрической энергии.

Использование электромеханического привода для изменения сопротивлений регулировочных резисторов R_1 и R_2 с обратной связью и обратной связи в магнитном усилителе позволит полностью автоматизировать процесс поддержания резонансного режима фильтросимметрирующего устройства, но, как и все параллельно работающие устройства, ФСУ не в силах устранить несимметричную нагрузку по фазам.

Для надежной и безопасной эксплуатации электрооборудования большое значение имеет качество электрической энергии, особенно в сельских электрических сетях, где качество электроэнергии по уровню несимметрии напряжений часто неудовлетворительно ввиду применения трансформаторов со схемой соединения обмоток – звезда – звезда с нулем, наличие большой доли однофазных нагрузок и протяженности линий свыше 500 м. Несимметрия напряжений выражается в неравенстве между собой модулей векторов фазных напряжений и углов сдвига между ними и оценивается коэффициентами несимметрии симметричных составляющих нулевой и обратной последовательностей, которые не должны превышать 2 % в течение 95 % времени суток и 4 % в течение 5 % времени суток. На уровень несимметрии напряжений влияет сопротивление нулевой последовательности сети, в которую входят сопротивление нейтрального провода и сопротивление нулевой последовательности питающего силового трансформатора 10/0,4 кВ – сопротивление обмоток трансформатора протеканию токов нулевой последовательности. Для потребите-





лей однофазной электроэнергетики несимметрия напряжений в трехфазной сети может сопровождаться низким (или наоборот, высоким) уровнем питающего напряжения или даже опасностью возникновения перенапряжений. Понижение напряжения ведет к сбоям в работе автоматики, повышение – перерасходом электроэнергии или выходом из строя электрооборудования. Устранение несимметрии напряжений предлагается осуществлять тремя трехобмоточными во вторичной цепи трансформаторами. Устройство включается в разрыв линии и может использоваться как для индивидуального, так и группового улучшения качества электроэнергии по уровню несимметрии напряжений [3, 11].

Принципиальная электрическая схема устройства симметрирования напряжений трехфазной сети [11] аналогична устройству для симметричного распределения нагрузки по фазам трехфазной сети [12], но более затратна, так как требует применения одновременно трех трансформаторов.

В Белорусском академическом техническом университете (г. Минск) разработано и получило распространение в системе электроснабжения Беларуси специальное симметрирующее устройство, представляющее собой дополнительную обмотку, наматываемую поверх всех трех фазных обмоток трансформатора Y/Y_H , включаемой в разрыв нулевого провода. Обмотка симметрирующего устройства рассчитана на длительное протекание номинального тока трансформатора (на полную однофазную нагрузку) и включена таким образом, что создаваемые ей в магнитопроводе трансформатора магнитные потоки $F_{ок}$ нулевой последовательности полностью компенсируют противоположно направленные магнитные потоки нулевой последовательности $F_{ор}$ в рабочих обмотках трансформатора, чем предотвращается перекося фазных напряжений [7]. Но предлагаемое симметрирующее устройство, как и трансформатор с обмотками, включенными по схеме «зигзаг», только исключает генерирование магнитных потоков нулевой последовательности, снижая перекося фазных напряжений, но не устраняет асимметрию нагрузки по фазам.

Передача электрической энергии сельскохозяйственным потребителям традиционно осуществляется длинными маломощными электрическими воздушными линиями электропередач. Подобная система обладает рядом недостатков – высокой стоимостью, большими эксплуатационными издержками, низкой надежностью, длительным временем восстановления электроснабжения после возникновения аварийного режима. Определяющим фактором надежности электроснабжения является недофинансирование реконструкции и ремонта линий – износ

ЛЭП растет, приближаясь к 100 %, растет количество аварийных отключений.

Динамика изменения аварийного потока отказов ВЛ 10 кВ (Ростовская область) показывает, что с 2003 по 2010 г. почти монотонно шел линейный рост отказов от 7,8 до 8,4 отказа в год. За 2010 г. поток отказов вырос до 9,8 отказа в год, а с 2010 по 2011 г. поток отказов вырос с 9,8 до 11,8 отказа в год, почти достигнув уровня отказов начала XXI в. – с 5 до 7,8 отказа в год. Средняя скорость нарастания потока отказов за исследуемый период составила 0,43 отказа в год на 100 км линий электропередач. За первые 30 мин устраняется 19 % всех аварий, за 6 ч – 56,5 % отключений, 23,5 % отказов устраняется от 6 до 24 ч, 0,89 % аварий устраняется за более, чем 24 ч. Среднее время устранения аварии – от 3,1 до 4,1 ч, 18 % всех отключений – из-за атмосферных осадков и ветра; 13 % – обрыв проводов; грозовые перекрытия, повреждение оборудования и разрушение изоляторов – по 12 %; причина 14 % отключений – не установлена. Наиболее эффективные способы борьбы с отключениями – усиление изоляции линий и распределительных устройств трансформаторных подстанций, плавка гололеда на проводах линий 10 и 35 кВ [2]. Одним из существенных факторов, определяющих качество электроснабжения, является влияние высших гармоник, приводящих к снижению эффективности процесса производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии из-за появления дополнительных потерь электроэнергии в основных элементах систем электроснабжения, ускоренному старению изоляции электрооборудования, ложным срабатываниям устройств релейной защиты и автоматики, повреждениям средств защиты и снижению безопасности обслуживающего персонала, функциональным нарушениям, связанным с отказами, сокращению срока службы, выходу из строя оборудования, браку продукции и авариям. Анализ искажений спектра гармоник тока и напряжения выявил присутствие 3, 5, 7, 8, 11-й и 21-й гармоник. Результирующая форма сигнала тока при сложении основной частоты с гармониками имеет сложную форму, искаженную наложением большого количества гармоник, наблюдаемых при сложных фазовых соотношениях. Результирующий сигнал имеет несинусоидальную форму. Воздействие этого сигнала проявляется в виде перегрузки и перегрева нейтрального провода, так как гармонические токи в нейтральном проводе не компенсируются, а их амплитуды складываются и составляют от 1,25 до 1,85 от амплитуды фазного тока. Токонесущая способность нейтрали оказывается не соответствующей нормативам, что приводит к функциональным нарушениям

ям, выходу из строя оборудования и снижению безопасности эксплуатируемого объекта (вследствие отгорания нулевого провода); ложным срабатываниям автоматических выключателей – УЗО не в состоянии суммировать высокочастотные составляющие, что в свою очередь приводит к ошибочным отключениям. Это связано с тем, что в одной цепи находится большое количество электрооборудования и из-за гармонических токов, протекающих в цепи, действующее его значение выше расчетного. Ложные срабатывания УЗО приводят к выходу из строя оборудования и браку продукции. Высшие гармоники снижают коэффициент мощности (норма – 0,71...0,82), приводя к необходимости увеличения мощности питающего трансформатора, понижая коэффициент полезного действия трансформатора, увеличивают потери мощности и напряжения в линии электропередач. Так как на сеть электропитания влияет импеданс источника, гармонические составляющие тока нагрузки искажают сигнал напряжения. Импеданс питающей сети складывается из двух составляющих: импеданса внутренней проводки от точки присоединения и импеданса питающего трансформатора. Искаженный ток нелинейной нагрузки вызывает искажение питающего напряжения на импедансе электропроводки. В результате напряжения искаженной формы прикладывается ко всем нагрузкам, включенным в цепь, приводя к генерации на них гармонических токов, даже если эти нагрузки линейны. В результате синусоидальный ток превращается в переменный ток произвольной остроконечной формы, модулированный высшими гармониками и момент перехода через «0» становится трудноуловимым, вызывая ложное срабатывание автоматики. Наиболее энергоемкие нелинейные однофазные нагрузки, образующие высшие гармоники: водонагреватели с тиристорным управлением мощности – 8 %, электронные балласты газоразрядных ламп среднего и высокого давления – 4 %, импульсные источники электропитания – 9 %; трехфазные: частотный электропривод – 64 %, холодильное оборудование – 16 % [6].

Специфика условий применения электрифицированного инструмента и бытовой техники в производстве и в быту, кустарные постройки с земляными полами определяют повышенную опасность поражения электрическим током людей и животных. В сельских электроустановках напряжением 0,4/0,23 кВ с глухозаземленной нейтралью преобладающей системой обеспечения электробезопасности является зануление – преднамеренное соединение металлических корпусов электрооборудования с многократно заземленным нуле-

вым проводом, выполняющим одновременно и рабочую, и защитную функцию, имеющую электрическую связь с заземленной нейтралью вторичной обмотки питающего силового трансформатора. При повреждении изоляции контакт фазного провода с корпусом электрооборудования вызывает короткое замыкание, приводящее к автоматическому отключению поврежденного участка плавкими предохранителями, автоматическими выключателями, токовыми реле от сверхтоков. Недостатки зануления: не защищает от поражения электрическим током в случае прикосновения к находящимся под напряжением токоведущим частям или оголенным проводникам; при ухудшении состояния изоляции вследствие неблагоприятных воздействий возрастает ток утечки на землю, развивается неполное короткое замыкание, не улавливаемое аппаратами защиты по максимальному току и от перегрузки, приводящее к электротравме или пожару; автоматические выключатели и плавкие предохранители, характеризующиеся большим разбросом токов и временем срабатывания, не обеспечивают быстрого действия при отключении поврежденных участков, особенно при неполном коротком замыкании; в случае обрыва нулевого провода условия электробезопасности ухудшаются для всего зануленного электрооборудования (электроприемники за точкой обрыва полностью лишаются защиты); при пробое изоляции в одном из электроприемников на нем (и на всех последующих электроприемниках) может появиться напряжение порядка 220 В; отсутствует защита от поражения электрическим током, стекающим с оборванного и лежащего на земле (особо опасным на влажной или мокрой почве) фазного провода воздушной линии напряжением 10, 6, 0,4/0,23 кВ, а также от электрических потенциалов на нулевом проводе и корпусах электроприемников, вызванных несимметрией нагрузки по фазам (характерно для сельского хозяйства и на предприятиях горной промышленности); удлинение проводов проводок, возрастание числа электроприемников в процессе эксплуатации и увеличение уставок защитных аппаратов приводит к загромождению защиты и снижению ее эффективности. Анализ смертельного электротравматизма в сельском хозяйстве показал, что в 50 % случаях поражение работников вследствие контакта с токоведущими частями произошло на молочных, откормочных фермах, свинофермах, предприятиях переработки сельскохозяйственной продукции и отходов производства, стройплощадках, в теплицах и скотобойнях; 60 % в воздушных сетях 0,4/0,23 кВ наружных электроустановках, мобильных и передвижных и на пилорамах;



по 33 % на низкой стороне питающих электроподстанций, а также в группе электроприемников, объединяющих мастерские, котельные, гаражи, кормоцеха, насосные станции, пункты послеуборочной обработки зерна и технических культур, мельницы и элеваторы; по 25 % комбикормовые заводы, пункты протравливания семян, склады, хранилища, бытовые. Более трети пожаров вызвано возгоранием электропроводки. Отсутствие средств для организации полноценного обслуживания приводит к износу электрооборудования, бытовые электроприемники становятся потенциально опасными для людей и животных: – с ростом парка электробытовых приборов и аппаратов в жилых помещениях (микроволновые печи, обогреватели, бытовые насосы, газонокосилки, пылесосы и другие приборы), возрастает вероятность контакта с ними малограмотного населения (в том числе и детей). Отсутствие электротехнической службы на селе вынуждает фермеров, работников мелких и средних предприятий, не имеющих специальной подготовки, самостоятельно эксплуатировать электроустановки, что требует применения более надежной защиты людей от электропоражения, какой является устройство защитного отключения, обладающее высокой чувствительностью, быстродействием, надежностью, самоконтролем работоспособности (лишено недостатков зануления). Для УЗО вместо искусственного заземления появляется возможность использования естественных связей металлических корпусов электрооборудования с землей. В России в обязательном порядке УЗО монтируется во всех квартирах новых и реконструируемых многоэтажных домов, в торговых, культурных, спортивных, медицинских и развлекательных центрах, на строительных площадках, предприятиях бытового обслуживания и общественного питания, на производственных участках, в общественных зданиях. Исключения составляют электроустановки, не допускающие по технологическим причинам перерывы в электроснабжении (инкубаторы), а также электроприемники, отключение которых может привести к ситуациям, опасным для потребителей (поражение электрическим током или пожар). В таких случаях для защиты людей применяют контроль изоляции и разделительные трансформаторы. Устройство

защитного отключения в этом случае применяется как дополнительное к усилению изоляции токоведущих частей, применению ограждений, установке барьеров, размещению электроустановок вне зоны досягаемости людей [1].

Предлагаемые авторами технические мероприятия позволяют повысить пропускную способность распределительных электрических сетей, надежность электроснабжения и безопасность однофазных потребителей электрического тока. Поставленная задача (рис. 2) достигается устройством для симметричного распределения нагрузки по фазам трехфазной сети [9], представляющим собой трехфазный разделительный одно- или многообмоточный (во вторичной цепи) трансформатор потребителя, каждая из вторичных обмоток которого имеет независимые от основной обмотки дополнительные витки, предназначенные для компенсации падения напряжения на линии, а каждый из потребителей многообмоточного разделительного трансформатора запитан от своей или от общей (для однообмоточного трансформатора) вторичной обмотки, в которой линия каждого потребителя запитана от трех фазных катушек трансформатора соединенных последовательно, любые две из которых включены согласованно, а третья – встречно.

Включение трехфазных катушек каждой вторичной обмотки трансформатора последовательно, любые две из которых включены согласованно, а третья – встречно, что позволяет получить однофазное переменное напряжение.

Запитывание однофазной обмотки одновременно от трех фаз позволяет равномерно распределить нагрузку по фазам и обеспечить абсолютную симметрию нагрузки линии, трансформатора подстанции и автономного генератора независимо от того, отбирает однофазную нагрузку один или несколько потребителей, или все потребители одновременно потребляют различную мощность.

Симметричная нагрузка автономного генератора линии и трансформатора подстанции позволяет увеличить пропускную способность электрической сети при пиках нагрузки, исключить перегрузку одной из фаз и предотвратить протекание тока по нулевому проводу, что в свою очередь позволит обеспечить повышение надежности всех защитных мероприятий, так как в принципе защищает сеть от «отгорания» нулевого провода.

Питание каждого из потребителей от своей обмотки многообмоточного трансформатора полностью исключает гальваническую связь с другими электропотребителями, повышает качество и безопасность электроснабжения. Питание потребителя через разделительный трансформатор обеспечивает гальваническую развязку

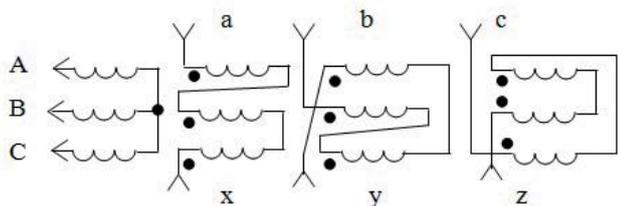


Рис. 2. Устройство для симметричного распределения однофазной нагрузки



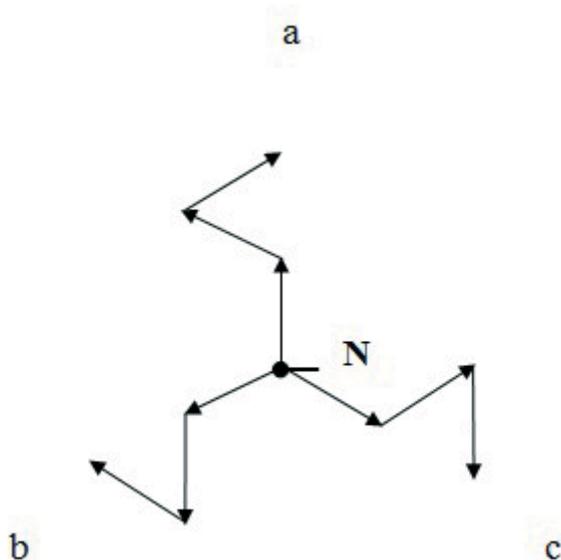


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений вторичных обмоток трансформатора

потребителя от внешней мощной сети и повышает безопасность электроснабжения. В этом случае появление тока в нулевом проводе свидетельствует либо об аварийной ситуации, либо о наличии у потребителя импульсной нагрузки.

Векторная диаграмма одной из возможных схем включения вторичных обмоток трансформатора (рис. 3) иллюстрирует возможность осуществления симметричной работы сети при несимметричной нагрузке.

Каждая из трех вторичных обмоток фазы генерирует 110 В, а их последовательное соединение обеспечивает на зажимах трансформатора фазное напряжение 220 В при условии включения каждой третьей обмотки фазы встречно по отношению к двум другим обмоткам. Независимо от нагрузок любой из фаз сеть и генератор всегда будут загружены равномерно по фазам, обеспечивая оптимальные условия работы генератора. Разделительный трансформатор потребителя также является заградительным фильтром, защищающим сеть от импульсных нагрузок.

Учитывая неразрывность магнитных потоков в магнитопроводе трансформатора, появляется возможность (хотя и со значительными искажениями симметрии фазных напряжений по фазе) восстановления трехфазного напряжения даже при обрыве одного (любого) фазного проводника сети между генератором и трансформатором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисов Ю.С., Некрасов А.А., Марчевский С.В. Повышение уровня электробезопасности защитой по току утечки // Сельский механизатор. – 2015. – № 12. – С. 31–33.
2. Корчагин П.Т., Таранов Д.М. Надежность электроснабжения удаленных потребителей // Сельский механизатор. – 2014. – № 3. – С. 28–29.
3. Криштопа Н.Ю., Егоров М.Ю., Самарин Г.Н. Техническое решение несимметрии напряжений // Сельский механизатор. – 2015. – № 5. – С. 28–29.

4. Орлов П.С. Трансформаторы. Часть II трехфазные силовые трансформаторы. – Ярославль: ЯГСХА, 2006. – 75 с.

5. Попов Н.М. Электроснабжение. Рабочие режимы сетей 0,38...10 кВ. – Кострома: КГСХА, 2010. – 202 с.

6. Сбитнев Е.А., Осокин В.Л. Влияние высших гармоник на качество электроэнергии в сельскохозяйственных предприятиях // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2015. – № 11. – С. 19–22.

7. Симметрирующее устройство для трансформаторов. Средство стабилизации напряжения и снижения потерь в сетях 0,4 кВ / А. Сердешнов [и др.] // Новости электротехники. – 2005. – № 3 (81). – С. 1–5.

8. Сергеев Б.Н., Киселев В.М., Акимова В.А. Электрические машины. Трансформаторы. – М.: Высш. шк., 1989. – 352 с.

9. Симметрирование однофазных нагрузок в сельских электрических сетях / Ф.Д. Косоухов [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2013. – № 2. – С. 9–13.

10. Снижение потерь электроэнергии в сельских сетях 0,38 кВ при несимметричной нагрузке / Ф.Д. Косоухов [и др.] // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 5. – С. 14–17.

11. Устройство симметрирования напряжения трехфазной сети / М.Ю. Егоров, Г.Н. Самарин, В.А. Шилин, С.М. Сукиасян, С.В. Поляков, С.Н. Луканов // Патент РФ, № 2552377 Н02J3/26. Заявка № 2013133563/07 от 18.07.2013. Оpubл. 10.06.2016.

12. Устройство для симметричного распределения нагрузки по фазам трехфазной сети / П.С. Орлов, Л.А. Голдобина, В.С. Шкрабак // Патент РФ № 2506676 Н02J 3/00 по заявке № 2012115381 от 17.04.2012. Бюл. № 4. от 10.02.14.

13. Филтросимметрирующее устройство для трехфазной сети с нулевым проводом / Ф.Д. Косоухин, А.О. Горбунов, В.А. Романов, М.Ю. Теремецкий // Патент на полезную модель. RU № 110876.

Орлов Павел Сергеевич, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Электрификация», Ярославская государственная сельскохозяйственная академия. Россия.

150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, 58.

Тел.: 89159774697.

Шкрабак Владимир Степанович, д-р техн. наук, проф. кафедры «Безопасность технологических процессов и производств», Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. Россия.

196601, г. Санкт-Петербург – Пушкин, Петербургское шоссе, 2.

Тел.: (812) 451-76-18.

Голдобина Любовь Александровна, д-р техн. наук, проф. кафедры «Строительство», Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». Россия.

199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2.

Тел.: 89043368678.

Шкрабак Роман Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры «Профессиональная аттестация и внедрение инноваций», Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. Россия.

196601, г. Санкт-Петербург – Пушкин, Петербургское шоссе, 2.

Тел.: (812) 451-76-18.

Кочкин Сергей Петрович, зав. кафедрой «Распределительные электрические сети», Ярославская государственная сельскохозяйственная академия. Россия.





150042, г. Ярославль, Тутаевское шоссе, 58.
Тел.: 89159774697.

Худяев Олег Владимирович, аспирант кафедры «Безопасность технологических процессов и производств», Санкт-Петербургский государственный аграрный университет. Россия.

196601, г. Санкт-Петербург – Пушкин, Петербургское шоссе, 2.

Тел.: (812) 451-76-18.

Ключевые слова: энергообеспечение; сельское хозяйство; безопасность; эффективность; электросети; нагрузка.

ASPECTS OF EFFICACY AND SAFETY UNBALANCED LOAD IN THE ELECTRIC SYSTEM

Orlov Pavel Sergeyeovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the chair "Electrification", Yaroslavl State Agricultural Academy. Russia.

Shkrabak Vladimir Stepanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair "Safety of Technological Processes and Productions", St. Petersburg State Agrarian University. Russia.

Goldobina Lyubov Alexandrovna, Doctor of Technical Sciences, Professor of the chair "Construction", Saint-Petersburg National University of Mineral Resources "Gorniy". Russia.

Shkrabak Roman Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the chair "Professional Certification and Innovation", St. Petersburg State Agrarian University. Russia.

Kochkin Sergey Petrovich, Head of the chair "Power Distribution Networks", Yaroslavl State Agricultural Academy. Russia.

Hydaiev Oleg Vladimirovich, Post-graduate Student of the chair "Safety of Technological Processes and Productions", St. Petersburg State Agrarian University. Russia.

Keywords: energy supply; agriculture; security; efficiency; power.

The results of studies on the effect of unbalanced load on the efficacy and safety of the use of electric energy in the agricultural sector of the country and electrified objects other economic activities are given. It is noted that balanced load by phase leads to a sharp reduction in electrical losses in the network. It is taken into account that a uniform load distribution phases reduces losses in the network 6 times compared with the single-phase load, and 2.25 times compared with the two-phase one. Uneven load adversely affects the operation of transformers, motors overheating, reducing the service life of incandescent lamps, electrical insulation. The authors proposed a solution - a device for symmetrical load distribution on the phases of the three phase network, that allows to solve some aspects of the problem under discussion.

УДК 621.314

ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ВЛАЖНОСТИ СИЛИКАГЕЛЯ МАСЛОНАПОЛНЕННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ 10/0,4 КВ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

ТРУШКИН Владимир Александрович, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

ШЛЮПИКОВ Сергей Владимирович, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

КИФАРАК Сергей Александрович, ПАО «МРСК Волги», Центральное производственное отделение филиала «Саратовские РС»

РОССОШАНСКИЙ Артур Русланович, Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова

В статье приведена типовая схема электроснабжения сельских потребителей, а также представлены статистические данные о парке трансформаторов потребительских подстанций. Отмечено, что одной из основных причин выхода из строя трансформаторов, эксплуатируемых в сельских электрических сетях, является влажность изоляции. Авторами предложено техническое решение возникшей проблемы.

Электроснабжение сельских потребителей осуществляется централизованно от энергосистем по следующей типовой схеме (рис. 1): районная подстанция средней мощностью 6300 кВ·А питает 4–5 воздушных линий напряжением 10 кВ, имеющих среднюю длину 20 км; к каждой линии 10 кВ подключено от 10 до 20 потребительских подстанций напряжением 10/0,4 кВ (средняя мощность 160 кВ·А); от кото-

рых отходят 3–4 воздушные линии 0,38 кВ средней протяженностью 0,6 км [1].

В этой системе немаловажную роль играют трансформаторы напряжением 10/0,4 кВ, несмотря на то, что они являются конечным звеном. Выход их из строя нарушает электроснабжение в основном конкретных потребителей.

Чтобы определить современное состояние парка данных трансформаторов, выполнено об-